

# 基于概率的水下传感器网络 CDMA 编码分配算法<sup>①</sup>

冯振兴, 杜秀娟, 柳 凡, 兰胜林

(青海师范大学 计算机学院, 西宁 810008)

**摘 要:** 水下传感器网络采用声波进行通信, 具有高时延、低带宽、高误码率等特点, 使得适用于无线电信道的 MAC 协议无法直接应用于水声信道, 给水下传感器网络协议的设计带来了很大的挑战. 因此, 我们提出了一种可以较高概率避免扩频码冲突的分布式的基于概率的水下传感器网络 CDMA 编码动态分配算法. 该算法不需要精确的时间同步, 并且能够动态适应水下传感器网络拓扑结构的变化, 适用于基于发送端的编码分配和基于接收端的编码分配. 仿真实验表明, 与传统的编码分配方式相比, 我们的算法突出了节点的个性化, 进一步降低了冲突的风险.

**关键词:** 码分多址; 水下传感器网络; 媒体接入控制; 编码分配

## Probability-Based CDMA Code Assignment Algorithm for Underwater Sensor Networks

FENG Zhen-Xing, DU Xiu-Juan, LIU Fan, LAN Sheng-Lin

(School of Computer Science, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China)

**Abstract:** Underwater sensor network (UWSN) adopts acoustic communication, characterized by high delay, low bandwidth, high error rate etc., resulting in communication protocols designed for radio channels are unsuitable for underwater acoustic channels, which brings significant challenges to the protocol design for UWSN. So, we propose a distributed probability-based CDMA code dynamic assignment protocol for underwater sensor networks which can avoid conflict between the spread codes with high probability. This algorithm does not require accurate time synchronization and can adapt to the dynamic topology of underwater sensor networks. The algorithm can be used for both the transmitter oriented and receiver oriented code assignment. Simulation indicates that our proposed algorithm performs better than the traditional code assignment algorithm due to highlight the personalization of each node, further reducing the risk of interference.

**Key words:** code division multiple access (CDMA); underwater sensor network (UWSN); medium access control (MAC); code assignment

## 1 引言

近年来, 随着无线传感器网络(WSN)的不断发展, 水下传感器网络(UWSN)也得到了研究人员的高度关注, 已经广泛应用在海洋环境监测、海洋地理信息数据收集、近海勘探、辅助航行、海啸预警和战术的监视等领域<sup>[1-4]</sup>. UWSN 采用水声进行通信, 而水声信道高误码率、长延迟、低带宽的特点, 导致地面的通信协议无法直接应用于水下环境<sup>[5,6]</sup>. 与传统的调制解调器相比,

水声调制解调器非常的耗能. 节点使用电池供电, 在恶劣的水下环境中充电和更换电池都非常困难. 此外, 水下节点的部署通常都比较稀疏, 大多数节点会随着水的流动或其他水下活动而移动, 并且有些节点会因为能量的耗尽或者硬件故障而失效, 这些都导致网络拓扑结构的变化, 从而给 UWSN 协议的设计带来了巨大的挑战. 一个合适的媒体访问控制(MAC)协议将会对系统的性能产生很大的影响, 尤其是低带宽、长延迟

<sup>①</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61162003);新世纪优秀人才支持项目(NCET-11-1025);青海省科技厅项目(2012-Z-902)

收稿时间:2013-08-10;收到修改稿时间:2013-09-10

的系统. UWSN 的 MAC 协议的设计目标是为共享信道在吞吐量、延迟、可靠性和能量等方面提供高效的控制.

一般情况下, MAC 协议大致分为两类<sup>[7]</sup>: 基于竞争的协议和无竞争的协议. 基于竞争的协议又包括随机访问和冲突避免. 随机访问机制发送者/接收者没有经过协调, 很容易产生冲突. 冲突避免的协议广泛使用基于 RTS/CTS 的方案来管理接收端和发送端的争用, 在一定程度上解决了隐藏终端问题以及数据包之间的冲突. 所以在数据流量较大的网络, 冲突避免协议要优于随机访问的协议. 然而基于 RTS/CTS 的协议无法解决暴露终端问题, 水下通信低带宽、长延迟的特点, 使用多次握手将大大降低信道的利用率, 增加了端到端的延迟.

无竞争的协议包括频分多址(FDMA)、时分(TDMA)和码分多址(CDMA), 信道依次被划分为频段、时隙和编码域. 众所周知, 水声信道的可用频带比较低, 所以 FDMA 无法适用于 UWSN. TDMA 需要时间同步, 而 UWSN 的高延时使得时间同步非常的困难. 水声信道需要长时间的侦听, 导致 TDMA 的效率有限.

在水声通信网络中 CDMA 是一个前景广阔的无竞争的多址接入技术, 它对水下环境中普遍存在的多径效应和多普勒效应有一定的弹性. 基于 CDMA 的多路访问协议已经广泛的应用在蜂窝网络, 由基站为每一个移动终端分配扩频码. UWSN 是一个多跳的自组织网络没有基站协调分配, 所以 UWSN 使用 CDMA 技术的一个重要的设计考虑是如何为节点分配不同的正交扩频码来避免发生冲突. 已经证明最优的正交扩频码分配是一个 NP 完全问题, 我们将尽力设计一个能量更加高效的正交扩频码分配算法. 本文提出了一个完全分布式的基于概率的 UWSN CDMA 编码分配算法. 该算法不需要精确的时间同步并且是完全分布式的, 节点使用自身的特征值来决定选择每一个扩频码的概率, 使冲突的风险进一步离散化.

## 2 相关工作

在 WSN 中正交扩频码的分配方式主要有以下 5 种<sup>[8]</sup>: 传统的静态编码分配(SCA)、基于发送端的编码分配(TOCA)、基于接收端的编码分配(ROCA)、基于节点对的编码分配(PairOCA)以及基于路径的编码分配(PathOCA). 传统的静态编码分配, 为每一个节点分配一个唯一的扩频码. 这样可以避免冲突, 但是需要使用大量的扩频码分配给每一个节点, 无形之中增加

了扩频码的长度, 造成数据包的负载过大. ROCA 中使用目的节点的扩频码发送数据包, 很可能与另一个发送到同一个接收节点的数据产生干扰. 所以 TOCA 要优于 ROCA 和 PairOCA, 同时后两者很容易受隐藏终端的影响. 目前, 基于 CDMA 的无线多跳分组网络, 通常使用 RTS/CTS 握手机制来动态确定接收者是否准备好接收数据. 但考虑到 UWSN 长延迟、低带宽的特点, 握手机制将导致很大的网络开销.

CDMA 机制解决了 FDMA 和 TDMA 所存在的一些问题, 但是 CDMA 本身仍然存在两个问题: 基于发送编码的干扰和基于接收编码的干扰.

### (1) 基于发送编码的干扰

基于发送端的编码分配, 发送节点使用自身的扩频码来传输数据. 两个节点无法感知到彼此的存在, 就会有使用同一个扩频码与一个接收节点进行通信. 这样就会产生图 1 中所示的基于发送端的编码分配问题. 因此节点和需要使用不同的扩频码, 防止在节点处产生冲突.

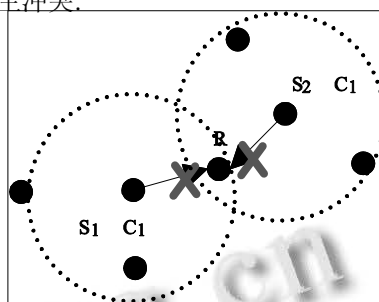


图 1 两跳的邻居使用相同的发送编码产生干扰

### (2) 基于接收编码的干扰

当一个站点发送数据到它的邻居, 而另一个站点同时发送数据到其他节点, 则很有可能在第一个接收节点处产生冲突. 如图 2 所示的基于接收端的编码分配问题. 节点与进行通信就会在节点处产生冲突, 所以两跳距离的节点和不能够使用了同一个扩频码.

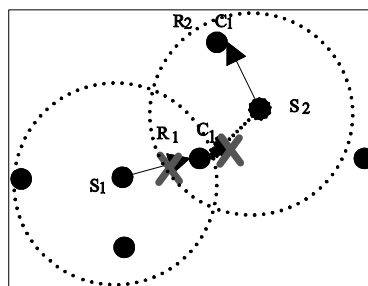


图 2 两跳的邻居使用相同的接收编码产生干扰

为了解决以上问题, 陈惠芳和谢磊等人实现了一个从分层的树形拓扑结构的底部节点到顶部节点的交错睡眠机制<sup>[9]</sup>, 而网络拓扑从图到树的简化使得多径传输和负载平衡是不可能的. Chang Wu Yu 等人提出了一种动态的分布式的基于节点对的编码动态分配算法<sup>[10]</sup>. 该算法结合了 RTS/CTS 机制、改进的忙音信号、功率控制以及特殊的 CDMA 编码分配策略, 很好的提高了扩频码的重用率和节能的效率. 由于 UWSN 的独特特点, 算法采用 RTS/CTS 机制和侦听机制, 每次通信之前都需要握手和侦听那么就会增加网络的传输延迟, 降低网络的吞吐量. 因此该算法无法应用于 UWSN.

现存的分布式算法中节点都是以相同的概率从未使用的扩频码集合中随机选择一个编码. 本文提出了一种分布式的基于概率的 UWSN CDMA 编码动态分配算法.

### 3 编码分配算法

UWSN 是一个以数据为中心的网络, 如果没有附加的位置信息, 那么感知到的数据就没有任何的实际意义. 所以我们通过一个由 sink 节点发起的定位过程来获得节点的位置信息. sink 节点周期性的广播具有定位信息的控制报文, 接收节点根据控制报文中的信息通过相应的定位算法获取或者更新节点的位置信息. 在 UWSN 中, 每一个节点维护一个邻居表如表 1, 记录了两跳以内的邻居节点的信息如 ID、位置、剩余能量、扩频码索引、距基站的跳数等. 邻居节点的信息可以从 sink 节点泛洪的控制报文中获取并不断更新.

表 1 节点邻居表信息

ID	Available Power	Location	Code index	Hops
ID1	AP1	{x1,y1,z1}	index1	.....
ID2	AP2	{x2,y2,z2}	index2	.....
ID3	AP3	{x3,y3,z3}	index3	.....
...	.....	.....	.....	.....

为了描述编码分配算法, 我们用一个无向图  $G=(V,E)$  来表示 UWSN, 其中  $V$  是传感器节点的集合,  $E=V \times V$  是可以通信的节点的边的集合. 如  $e_{ij}$ , 表示节点  $i$  和节点  $j$  可以相互通信, 即节点  $i$  和节点  $j$  在彼此的通信范围, 它们可以收到彼此发送的数据, 如

图 3. 节点使用的是全向天线, 工作在半双工模式.

考虑到 TOCA 和 PairOCA 很容易受到隐藏终端的影响, 所以我们的分层的编码分配算法采用 TOCA. 在基于 TOCA 的方案中, 不管是两个不相邻的节点共享一个中间节点, 还是两个相邻的节点共享一个中间节点都会产生干扰. 如图 1 中节点 node-6 可能会与节点: node-2、node-3、node-4、node-7、node-8、node-11 以及 node-12 的扩频码冲突; 节点 node-7 可能会与 node-2、node-3、node-6、node-9 和 node-13 的扩频码产生冲突. 因此节点在选择扩频码时, 必须防止与两跳的邻居使用同一个扩频码.

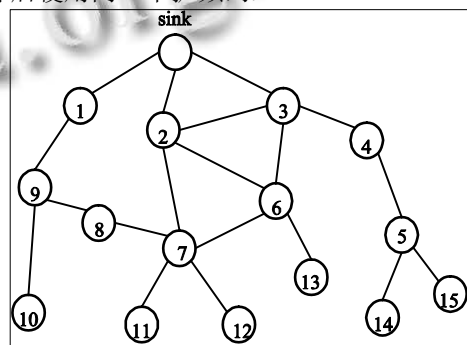


图 3 网络拓扑结构

节点选择扩频码时需要执行以下过程:

(1) 通过线性加权的方法得到节点自身的特征值.

传感器节点根据特征值  $\lambda$  的不同, 选择每一个扩频码的概率就不同. 但并非概率高的扩频码就一定能够被选中, 概率低的扩频码也完全有可能被选中. 基于概率选择的方法是为了使节点选择每一个扩频码的概率离散化, 从而突出各个节点的个体差异, 降低它们选用相同的扩频码的几率.

接下来我们将就节点如何获取自身的特征值进行说明. 每一个节点都有它独有的特征包括可用的能量 (Available Power AP)、距离基站的跳数(Hops H)、地理位置(Location L)、邻居节点的个数(Neighbors NS)等, 每个方面都是影响全局的一部分. 所以, 可以用向量的形式表示这些线性无关的影响因素.

$$f = [AP, H, L, NS] \tag{1}$$

参考因素中的地理位置我们可以用该节点到 sink 节点的距离  $L$  来表示:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \tag{2}$$

其中,  $Node_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $Sink(x_0, y_0, z_0)$

由于参考因素所起的决定性作用不相同,因此为每一个分量分配一个权值.基于 CDMA 的 UWSN 扩频码冲突的概率与邻居节点的个数有着密切的联系.为了减少邻居节点扩频码冲突的概率,可以相应的提高邻居节点的个数所占的权值,从而有效的降低扩频码的冲突的概率.则参考因素所对应的权值向量可以表示为:

$$w = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]^T, \sum_{i=1}^4 \omega_i = 1, 0 < \omega_i < 1 \quad (3)$$

从而可以得到  $Node_i$  的特征值  $\lambda_i$ :

$$f \cdot w = AP \cdot \omega_1 + H \cdot \omega_2 + L \cdot \omega_3 + NS \cdot \omega_4 \quad (4)$$

(2) 根据节点自身的特征值来确定每一个扩频码被选中的概率.

我们将网络中使用的扩频码的数量定义为  $m$ . 每一个节点根据自身的特征值  $\lambda$  以及两跳的邻居节点所使用的扩频码,从而得到可用的扩频码并按照一定的概率从  $k$  个扩频码中选择一个扩频码,根据 Poisson 分布的性质节点选择扩频码的概率定义为:

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

其中,对于每一个特征值  $\lambda$  都有:

$$\sum_{k=0}^m P(k) \approx 1$$

从公式(5)可以看出,对于传感器网络中的节点,由于特征值的不同选择每一个扩频码的概率不完全相同,选择扩频码的概率有的高、有的比较低.

基于概率的 CDMA 编码分配过程如下:

```
//节点 X 尚未分配编码,采用分布式的随机编码分配
while (node-X' s code isn' t assigned)
{
    assigned codesetx = ∅;
    available codesetx = ∅;
//已分配编码集合、可用编码集合初始化为空
check node-X' s neighbor information table;
add the used code to the assigned codesetx;
available codesetx = codeset - assigned codesetx;
/* 根据邻居表信息确定集合 assigned codesetx,
available codesetx 的元素 */
IF (available codesetx != NULL)
//可用编码集合 available codesetx 不为空
THEN
```

```
{ //获取特征值并根据特征值 λ(i) 计算编码分配概率
    get the λ of node-X and calculate the probability
    Pi for each code in the available codesetx;
    R=random(); //产生一个[0,1]之间的随机数
}
IF (Pi > R)
    THEN chose codei as node-X's code
/* 若编码 i 的概率 Pi 大于随机数 R, 则节点 X 选择 codei 作为扩频码 */
Endif
Endif
}
```

## 4 仿真结果

本节以 Mat-lab 为仿真平台,通过了解网络中节点的分布情况、距离基站的跳数、邻居节点的数量、地理位置等.计算出节点的特征值,得到节点选择每一个扩频码的概率.仿真场景的主要参数如表 2 所示,节点的拓扑分布如图 3 所示.

表 2 仿真场景参数设置

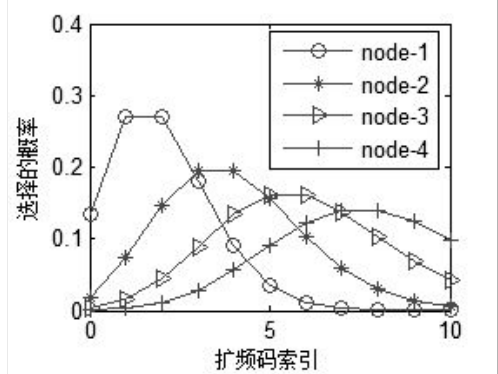
参数类型	参数值
节点的初始能量	0.8J
数据包长度	150bit
带宽	15kbps
声速	1500m/s
传播半径	1500m
发送功率	1.8w
接收功率	0.75w

为弥补传统的静态的编码分配算法选择扩频码单一化的不足,我们提出了基于概率的编码分配算法,进一步突出节点的个性化,这样可以使节点选择每一个扩频码的概率高低不同,降低发生冲突的风险.

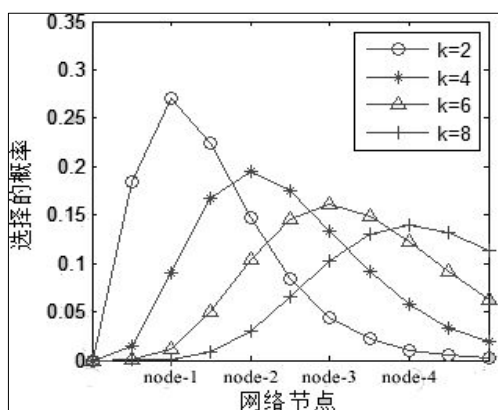
从图 4(a)-(b)可以看出节点的  $\lambda$  不同,选择每一个扩频码的概率也不同.节点  $node-1$  选择扩频码 1、2 的概率比较高;而  $node-2$ , 选择扩频码 3、4 的概率相对较高;  $node-3$ 、 $node-4$  分别选择扩频码 5、6 和 7、8 的概率比较高.

图 5(a)是冲突节点数分别为 4 和 5 时,所对应的改进的算法和传统的算法在选择各个扩频码时冲突的概率的结果图.根据图像所围的面积可知,与传统的方

式相比改进的算法将扩频码的冲突率降低了 24%.



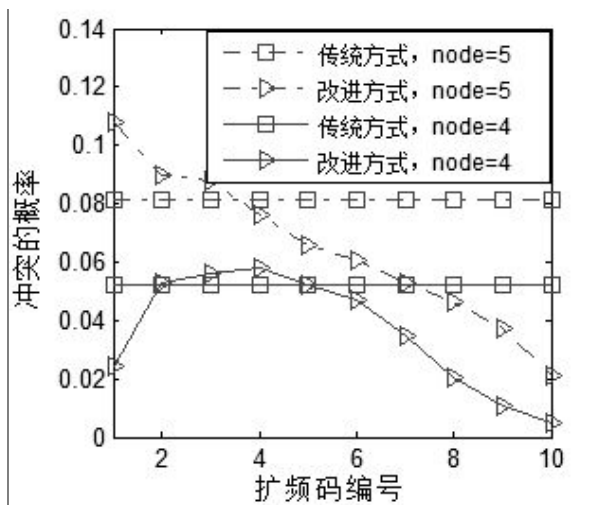
(a) 选择编码的概率



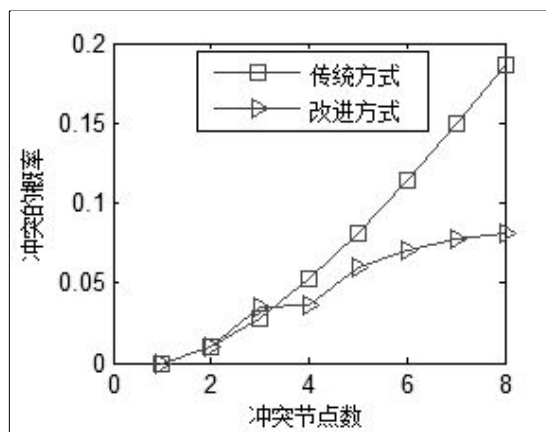
(b) 不同的特征值选择相同扩频码的概率

图 4 选择编码的概率

图 5(b)是不同的冲突节点数冲突概率的比较. 通过计算改进算法中相同冲突节点数冲突概率的平均值与传统的方式进行比较. 同样可以根据图像所围的面积得出改进的算法优于传统的方式 20%.



(a) 扩频码冲突概率



(b) 冲突节点数与冲突概率

图 5 冲突率对比

本文充分利用了节点的差异性, 突出每一个节点区别于其他节点的特性, 基于概率的编码分配能够弥补传统的编码分配单一化的问题, 使冲突的风险进一步“离散化”, 减少了冲突造成的重传, 从而提高了信道的利用率.

### 5 结论

经过对传统的静态的扩频码的分配方式的分析, 我们提出了一种基于概率的扩频码动态分配算法. 利用节点的特征值  $\lambda$  使得每一个节点选择各个扩频码的概率差异化. 仿真实验表明, 该算法可以有效的降低相邻节点的扩频码的冲突率, 提高节点发送信息的成功率, 从而达到能量高效的目的.

### 参考文献

- 1 Tan HX, Seah WKG. Distributed CDMA-based MAC protocol for underwater sensor networks. Proc. of the IEEE Conference on Local Computer Networks. 2007. 26-33.
- 2 Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. Ad Hoc Networks, 2005, 3(1): 257-279.
- 3 Pompili D, Melodia T, Akyildiz IF. A CDMA-based medium access control underwater acoustic sensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2009, 4(8): 1899-1909.
- 4 郭忠文, 罗汉江等. 水下无线传感器网络的研究进展. 计算机研究与发展, 2010, 47(3): 377-389.
- 5 Du XJ, Huang KJ, Liu F etc. Micro-ANP: A novel network

(下转第 82 页)

表 4 性能测试结果

连接数	CPU 占用率	内存占用数	1 到 100 推送			1 到 1000 推送			全体推送		
			最快	最慢	成功率	最快	最慢	成功率	最快	最慢	成功率
10000	14.5%	25MB	<1s	<1s	100%	<1s	<1s	100%	10s	14s	100%
20000	25.0%	50MB	<1s	<1s	100%	<1s	<1s	100%	25s	30s	100%
30000	33.2%	76MB	<1s	<1s	100%	<1s	1s	100%	40s	46s	100%
40000	40.1%	101MB	<1s	<1s	100%	<1s	1s	100%	63s	72s	100%
50000	45.1%	126MB	<1s	<1s	100%	1s	1s	100%	104s	118s	100%
75000	55.3%	179MB	<1s	<1s	100%	1s	1s	100%	193s	212s	100%
100000	62.4%	235MB	<1s	<1s	100%	1s	1s	100%	286s	334s	100%

## 5 总结与展望

本文论述了基于 MQTT 协议的消息推送服务器的设计与实现, 通过与客户端的联合, 可以对不同平台上的用户进行实时、准确的消息推送, 目前已应用于实际产品中, 经过测试证明, 系统运行良好, 并且可以支持 10 万以内的连接并发数。

下一步的工作将集中在通过建立服务器集群来支持更多的用户上, 同时进一步加强服务器的可靠性及稳定性。

### 参考文献

- 刘军霞,熊选东,付建丹.基于发布/订阅的推模式服务调用.计算机系统应用,2012(12):196-199.
- 李小智.基于消息中间件的服务器推送技术的应用研究[学位论文].长沙:湖南大学,2010.
- 梅蕊.跨服务器消息发布与推送机制的研究[学位论文].武汉:华中科技大学,2011.
- IBM. MQ Telemetry Transport.http://mqtt.org.2013-06-05.
- IBM, Eurotech. MQTT V3.1 Protocol Specification. http://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/mqtt-v3r1.html, 2010-08-24.
- 唐诚.Redis 数据库在微博系统中的实践.厦门城市职业学院学报,2012,14(3):55-59.
- Schram A, Anderson KM. MySQL to NoSQL: data modeling challenges in supporting scalability. Proc. of the 3rd Annual Conference on Systems, Programming, and Applications: Software for Humanity. ACM. 2012. 191-202.
- 魏晓玲.MD5 加密算法的研究及应用.信息技术,2010,(7):145-147.
- Gauravaram P. Security Analysis of salt|| password Hashes. Advanced Computer Science Applications and Technologies(ACSAT), 2012 International Conference on. IEEE. 2012. 25-30.
- 杨梅,杨平利,宫殿庆.ACL 技术研究及应用.计算机技术与发展,2011,21(6).
- 唐子蛟,李红蝉.基于 ACL 的网络安全管理的应用研究.四川理工学院学报(自然科学版),2009,22(1):48-51.

(上接第 166 页)

- protocol architecture for underwater sensor network. ICSMIM. 2012.
- Du XJ, Lan SL, Liu F etc. Micro-ANP network protocol architecture and simulation implementation. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(4):1757-1768.
- Kim JP, Lee JW, Jang YS, etc. A CDMA-based MAC protocol in tree-topology for underwater acoustic sensor networks. International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2009. 1166-1171.
- Hu LM. Distributed code assignment for CDMA packet radio networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993. 668-677.
- Chen HF, Xie L, etc. An improved CDMA-based MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing(WiCom). 2011. 1-4.
- Yu CW, Wu TK, etc. A distributed code assignment algorithm with high code reusability for CDMA-based ad hoc networks. The First International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. 2006. 329-340.